

LE COIN DU LABORATOIRE

La strioscopie appliquée à l'étude de l'ébullition et du dégazage

The use of strioscopic observation methods in boiling and de-aeration studies

PAR M. BÉHAR ET R. SÉMÉRIA,

INGÉNIEURS AU SERVICE DES TRANSFERTS THERMIQUES DU CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES DE GRENOBLE

La sensibilité des dispositifs strioscopiques en noir ou en couleurs est très élevée dans l'eau non isotherme. La difficulté est donc ici d'isoler le phénomène à observer des phénomènes parasites par un choix judicieux du système optique de la cuve d'observation. On décrit les solutions adoptées, et on donne quelques résultats caractéristiques.

Black-and-white and colour strioscopic equipment is highly sensitive in non-isothermal water, and the main difficulty in its use therefore, is to successfully isolate the phenomenon one wishes to observe from stray effects by choosing a suitable optical system and observation tank. The article describes the solutions adopted and gives a few representative results.

1. — INTRODUCTION

Utilisée depuis longtemps en aérodynamique où elle constitue un moyen d'observation de choix, la strioscopie n'a été que très peu employée dans l'étude de la mécanique des liquides. Ceux-ci n'étant pratiquement pas compressibles, les variations d'indice liées au gradient de densité sont inexistantes. Il n'en va plus de même dès qu'apparaît un phénomène thermique; dans l'eau, par exemple, un changement de température d'à peine 0,2 °C a le même effet sur la densité qu'un changement de pression de 1 atmosphère. Si, à présent, on compare l'air et l'eau, on constate qu'une même variation relative du gradient de densité entraîne dans le cas de l'eau une courbure des rayons lumineux près de mille

fois plus importante que pour l'air. C'est précisément cette trop grande sensibilité qui limite l'application de la strioscopie à l'observation des mouvements thermiques au sein d'un liquide. Il est en effet très difficile de séparer le phénomène que l'on veut étudier, des mouvements thermiques parasites qui l'entourent; c'est en particulier le cas de l'étude de l'ébullition sur un élément chauffant placé dans de l'eau maintenue à température de saturation. Les chauffages auxiliaires produisent des mouvements de convection tels, qu'ils peuvent rendre indiscernables les mouvements de liquide dus à l'ébullition. Il s'agira donc, en ce qui nous concerne, d'isoler le seul phénomène d'ébullition; nous avons, pour cela, à partir d'un schéma classique de montage strioscopique, introduit deux modifications

essentielles qui nous ont permis d'obtenir déjà quelques résultats qualitatifs sur le mécanisme même de l'ébullition. Ces deux modifications portent sur l'emploi d'objectifs à grande ouverture et à courte focale, et sur l'utilisation d'une cuve d'expérimentation qui permet de réaliser un chauffage de l'eau très homogène.

2. — DESCRIPTION DU BANC DE STRIOSCOPIE

Tout l'ensemble de l'appareillage est supporté par un banc optique de 2 m de long, sur lequel peuvent glisser un certain nombre de plateaux. Le guidage de la translation de ces plateaux est assuré avec une grande précision grâce à la rectification des différentes portées. Chacun de ces plateaux est muni de mécanismes de déplacement à mouvements micrométriques et à ratrapages de jeux, permettant tous les alignements et centrages nécessaires des pièces optiques.

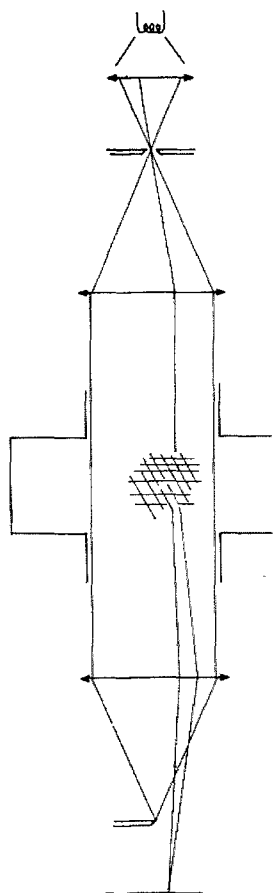


FIG. 1

Schéma du montage optique.

Le schéma optique de montage est, comme nous l'avons dit, classique dans son ensemble (fig. 1); on a utilisé la méthode de Toepler-Foucault à deux objectifs ainsi que son extension à la strioscopie colorée par interposition d'un prisme dispersif. L'enregistrement du phénomène étudié se fait en général par cinématographie ultra-rapide à l'aide d'une caméra FASTAX 16 mm (maximum : 9 000 images/seconde). Dans quelques cas particuliers, la prise de vue photographique est suffisante; l'utilisation d'un appareil reflex est indispensable, à cause de la faible profondeur de champ.

La source de lumière est constituée par une lampe d'éclairage 100 W/110 V survoltée jusqu'à 220 V pendant le court instant de la prise de vue. On a ainsi d'une manière très économique un éclairage actinique et puissant permettant des temps de pose de l'ordre de 0,1 à 0,3 milliseconde avec des films à haute rapidité (Kodak Tri-X). La même lampe permet, dans ces conditions, plus d'une heure de prise de vue. Le filament est boudiné en une hélice à pas serré et à axe rectiligne formant ainsi une source linéaire utilisable soit horizontalement, soit verticalement, suivant le plan de sensibilité recherché.

L'image du filament est focalisée sur une fente Bouty afin d'avoir une source à caractéristiques géométriques bien définies.

On trouve ensuite de part et d'autre de la cuve, deux objectifs identiques de chambre photographique 9×12 ; leur focale est de 15 cm (rappelons que les objectifs utilisés dans l'étude des gaz sont des miroirs sphériques ayant de un à plusieurs mètres de longueur focale). Leur ouverture relative est de 4,5, ce qui permet d'avoir un champ suffisant, celui-ci étant directement lié au diamètre des objectifs. Par contre, la profondeur de champ est assez faible, ce qui, dans notre cas, constitue un gros avantage, car les mouvements thermiques à étudier sont isolés dans un seul plan; les inévitables mouvements parasites restent flous, le contraste s'en trouve augmenté. En prise de vue cinématographique ou en observation visuelle, on travaille avec un rapport image/objet compris entre 0,5 et 1. Côté image, en strioscopie colorée, on utilise une fente classique à lèvres mobiles symétriquement; en noir et blanc, par contre, la fente est remplacée par un objet occultant exactement l'image de la source donnée par le deuxième objectif. Cet objet est formé par reproduction photographique sur film à grand contraste (Kodak microfilm) de la source lumineuse; on a ainsi sur le film négatif un trait noir à bords francs sur un support transparent. On dispose de plusieurs reproductions à différentes échelles afin de s'ajuster au mieux avec la sensibilité et le contraste recherchés.

3. — CUVE D'EXPÉRIMENTATION

Elle a été conçue pour assurer un chauffage de l'eau le plus uniforme possible. La cuve elle-même est constituée d'un seul bloc parallélépipédique de laiton massif, creusé d'une cavité de 250 cm³ et percé de deux trous cylindriques alignés pour les hublots (fig. 2).

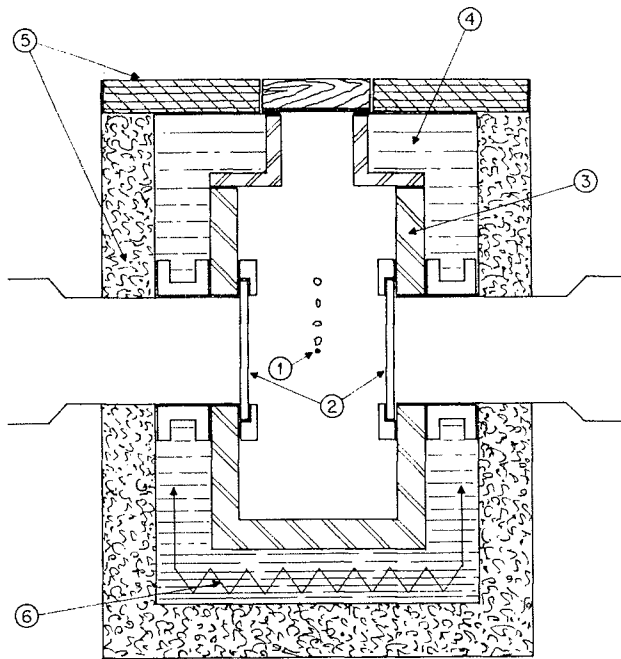


FIG. 2

Cuve d'observation strioscopique.

1 : élément chauffant - 2 : hublots d'observation - 3 : cuve en laiton - 4 : huile - 5 : calorifuge - 6 : résistance chauffante.

Les parois ont 2 cm d'épaisseur environ, le couvercle, en laiton également, permet le passage des supports de l'élément chauffant, du thermomètre et des orifices de vidange et de remplissage. Cette première cuve est plongée dans de l'huile de silicone contenue dans une autre cuve en laiton chauffée par un enroulement de fil résistant thermocoax qui y est plongé; les spires sont réparties de manière à assurer une bonne convection naturelle. La cuve à huile est soigneusement calorifugée par une forte épaisseur de vermiculite. Les hublots, risquant de constituer des parois froides, sont protégés par des tubes très longs dont une partie est chauffée par l'huile; l'air situé dans ces tubes constitue donc un isolant thermique efficace pour les hublots.

4. — RÉSULTATS OBTENUS

Des films enregistrés à 1 000 images par seconde, avec un élément chauffant constitué par un fil de platine horizontal de 0,3 mm de dia-

mètre, ont permis déjà d'aboutir à quelques conclusions préliminaires.

1° Lorsque l'eau est à une température voisine de la température d'ébullition, les bulles explosent sur le fil, puis se détachent. En plaçant la fente horizontalement, on met évidence le film thermique surchauffé entourant le fil. Ce film est détruit localement et périodiquement par les bulles qui le projettent au sein du liquide (phot. 1, 2 et 3). Ce mécanisme (scavenging effect) est à l'origine de nombreuses théories récentes.

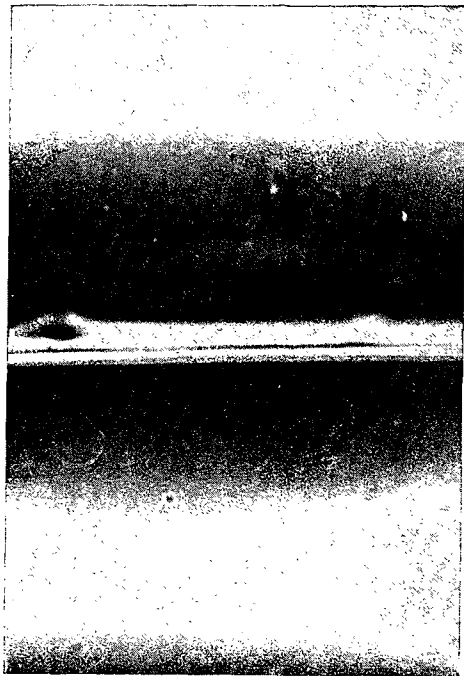
D'autre part, à l'arrière de la bulle qui vient de se détacher, on observe une colonne d'eau chaude (phot. 4) au voisinage du film thermique, ce qui confirme aussi certaines théories considérant la formation de colonnes d'eau chaude au-dessus des germes générateurs comme un mécanisme suffisant pour expliquer le bon coefficient de transfert en ébullition.

Dans les conditions de nos expériences, ces deux mécanismes existent. Le premier est facilement observable sur les germes à fonctionnement intermittent, le temps de contact t_c du liquide entre le départ d'une bulle et la naissance de la suivante, étant alors suffisamment grand pour reconstituer presque totalement le film thermique. Par contre, sur les germes à temps de contact quasi nul ($t_c < 0,3$ ms) le second mécanisme reste seul observable. De même, sous pression jusqu'à 20 atm, nous n'avons pu observer ce dernier mécanisme.

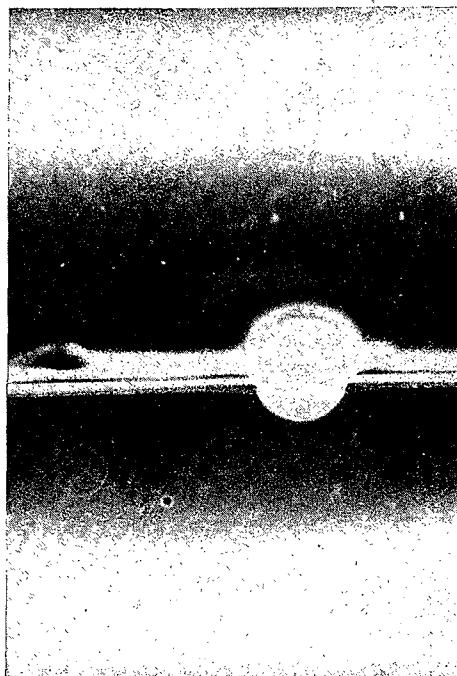
2° Lorsque l'eau est à une température très inférieure à la température d'ébullition, les bulles naissent et se condensent sur la paroi en moins de 1/1 000^e de seconde. Dans ce type d'ébullition locale, on supposait, là aussi, que le film thermique était projeté dans le liquide par l'explosion de la bulle. Or, nos essais montrent clairement que, si la bulle en naissant (phot. 5 et 6) soulève le film thermique, par contre, après la condensation brutale sur la paroi, se forme au point de condensation un geyser projetant l'eau chaude très loin dans le liquide froid (phot. 7 et 8).

Ce mécanisme d'échange thermique est extrêmement efficace; il permet notamment d'expliquer l'excellent coefficient d'échange en ébullition locale à forte sous-saturation, malgré la faible population de bulles, ce qui, dans un canal de réacteur nucléaire à refroidissement par eau, se traduit par un faible « taux de vide » et une petite augmentation de la perte de charge par rapport à la simple phase.

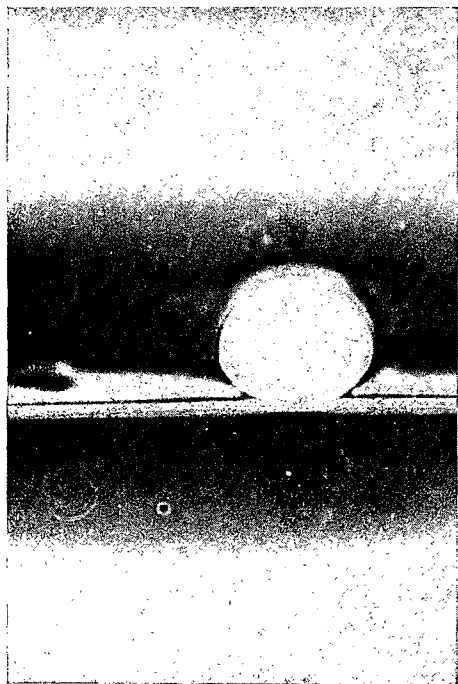
Les essais se poursuivent sur différents éléments chauffants, à différentes pressions et sur différents liquides de façon à préciser l'importance relative des différents mécanismes mis en évidence.



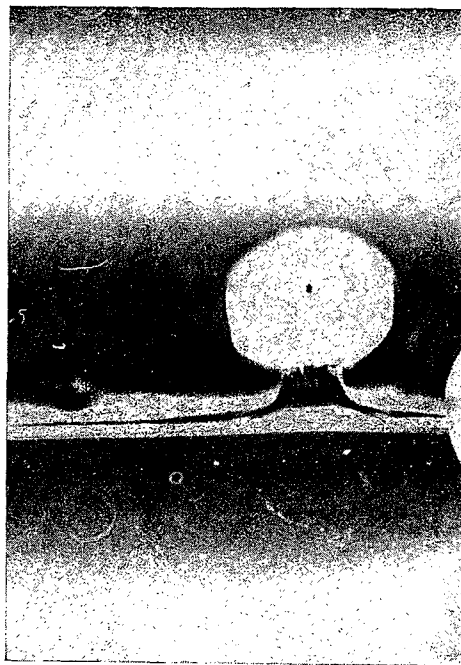
PHOT. 1



PHOT. 2



PHOT. 3



PHOT. 4



PHOT. 5



PHOT. 6



PHOT. 7



PHOT. 8